Iranian Journal of Animal Science Research
Homepage: http://ijasr.um.ac.ir

Research Paper
Vol. 14, No. 4, Winter 2023, p. 519-530

Fitting of some Nonlinear Models for Predicting Ruminal Fermentation Kinetics in Different Forages

Khalil Zaboli[1*], Saeid Moradi[2]

Received: 02-06-2021
Revised: 16-07-2022
Accepted: 19-07-2022
Available Online: 19-07-2022

How to cite this article:
Zaboli, K., & Moradi, S. (2023). Fitting of some nonlinear models for predicting ruminal fermentation kinetics in different forages. *Iranian Journal of Animal Science Research, 14*(4),519-530.
DOI:10.22067/ijasr.2022.70783.1028

Introduction The *in vitro* gas production test is used as a laboratory method for studying the ruminal fermentation of feed-stuffs. This method is an ideal technique, because it allows to record gas production at different hours an incubation time. In this technique, the parameters of fermentation kinetic are predicted using nonlinear models. The Exponential Model (EXP) is the easiest nonlinear model which is applied for this regard. However, it has been reported that some nonlinear models predict the parameters of gas production kinetic more accurately than the EXP model. In this study, different forages were used as feed samples and the accuracy of some nonlinear models for predicting the parameters of gas production kinetic has been studied and compared.

Materials and Methods For this experiment, alfalfa forage (first, second and third cutting), sainfoin hay, wheat straw, barley straw and corn silage were used as feed samples. Feed samples were analyzed for Dry matter, ash, crude protein, neutral detergent fiber and acid detergent fiber according using standard methods. Rumen fluid was collected from three ruminally fistulated mature Mehraban rams before the morning feeding. Obtained rumen fluids were pooled and strained into a pre-warmed (38 to 39 ˚C) insulated flask and immediately transported to the laboratory. In laboratory, ruminal fluid was filtered through four layers of cheese cloth and then mixed continuously with CO_2 and maintained near 39º C before usage. To evaluate the ruminal fermentation kinetic of feeds, the *in vitro* gas production test was carried out during 144 h incubation time for 3 run. For this purpose, 200 mg of dried and milled feeds with 30 ml of buffered rumen fluid were poured into glass vials (in 3 replicates). Two glass vials containing 30 ml of buffered rumen fluid without substrate were considered as blanks. After capping (plus tow glass vials as blanks), all glass vials were incubated at 39 ° C. The volume of gas produced was recorded at 2, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20, 24, 36, 48, 72, 96, 120, 144 h after incubation. The obtained results (volume of gas produced at each incubation time) were fitted to four nonlinear models included the exponential (EXP), Gompertz (GOM), Richard (RCH) and France (FRC) models. The mean square error (MSE), coefficient of determination (R^2), residual mean absolute deviation (RMAD) and mean percentage error (MPE) statistics were used as goodness of fit parameters. The run test, accuracy factor (AF), Akaike information criterion (AIC) and Bayesian information criterion (BIC) were used to compare the accuracy of the models for predicting the gas production kinetic.

Results and Discussion The results showed that the asymptotic gas volume (A) predicted by the FRC model (104.68 ml per 200 mg dry matter) was significantly different from the EXP (100.18 ml per 200 mg dry matter) model ($p < 0.05$). But the value of A predicted by the EXP, GOM and RCH models did not show a significantly difference. The rate of gas production (c) predicted by the studied models were significantly different and the lowest value was observed in the FRC model ($p<0.05$). The highest and lowest values for MSE (15.11) and R^2 (0.984) were observed in the EXP model, respectively. Which indicated the EXP model goodness of fit was weak compared to the other models. The RMAD statistic in the studied models had significantly difference ($p<0.05$) and the highest (2.88) and lowest (0.85) values were observed in the EXP and FRC models, respectively. So, the FRC and EXP models had the highest and lowest goodness of fit, respectively. The MPE statistic in the FRC and RCH models were closer to zero (0.32 and 0.48, respectively) compared to the other

1- Assistant Professor, Animal Science Department, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
2- M.Sc. Graduated, Animal Science Department, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
*Corresponding Author Email: zaboli@basu.ac.ir

models (EXP and GOM models), which indicated better goodness of fit in these models. The run test was significant in the EXP and GOM models ($p<0.05$). So, these models were less accurate for predicting the gas production kinetic. The value of AF, AIC and BIC statistics (2.85, 15.87 and 10.04, respectively) showed that the FRC model had the highest accuracy for predicting the gas production kinetic among the studied models.

Conclusion The results showed that the EXP model had the lowest accuracy for predicting ruminal fermentation kinetic of feeds, among the studied models. However, the FRC model had the highest accuracy.

Keywords: Forage, Gas production test, Goodness of fit, Non-linear models

نشریه پژوهشهای علوم دامی ایران
Homepage: https://ijasr.um.ac.ir/

مقاله پژوهشی

جلد ١٤، شماره ٤، زمستان ١٤٠١، ص ٥٣٠-٥١٩

برازش برخی از مدل‌های غیر خطی به‌منظور پیش‌بینی کینتیک تخمیر شکمبه‌ای در علوفه‌های مختلف

خلیل زابلی[1]* و سعید مرادی[2]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۸

چکیده

این آزمایش به‌منظور مقایسه دقت برخی از مدل‌های غیرخطی در پیش‌بینی کینتیک تولید گاز در تعدادی از خوراک‌های علوفه‌ای انجام شد. ابتدا، آزمون تولید گاز ۱۴۴ ساعته با استفاده از علوفه‌های یونجه (چین اول، چین دوم و چین سوم)، علوفه اسپرس، کاه گندم، کاه جو و سیلاژ ذرت انجام شد. سپس، حجم گاز تولید شده در زمان‌های مختلف انکوباسیون با استفاده از مدل‌های اکسپوننشیال (EXP)، گومپرتز (GOM)، ریچارد (RCH) و فرانس (FRC) برازش شدند. نکویی برازش مدل‌ها با استفاده از آماره‌های میانگین مربعات خطا (MSE)، ضریب تعیین (R^2)، انحراف مطلق میانگین باقی‌مانده (RMAD) و میانگین درصد خطا (MPE) تعیین شد. از آزمون تست اجرا (run test)، فاکتور صحت (AF)، معیار اطلاعات آکائیک (AIC) و معیار اطلاعات بیزی (BIC) به‌منظور بررسی دقت مدل‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد، پتانسیل تولید گاز (A) پیش‌بینی شده توسط مدل FRC (۱۰۴/۶۸ میلی‌لیتر به‌ازای ۲۰۰ میلی‌گرم ماده خشک) تفاوت معنی‌داری با مدل EXP (۱۰۰/۱۸ میلی‌لیتر به‌ازای ۲۰۰ میلی‌گرم ماده خشک) داشت ($p<0/05$). مدل EXP دارای بیشترین مقدار MSE (۱۵/۱۱) و کمترین مقدار R^2 (۰/۹۸۴) بود ($p<0/05$). مقدار RMAD در مدل EXP بیشترین (۲/۸۸) و در مدل FRC کمترین (۰/۸۵) مقدار بود ($P<0/05$). مقدار MPE در مدل‌های FRC و RCH (به‌ترتیب ۰/۳۲ و ۰/۴۸) در مقایسه با سایر مدل‌ها به عدد صفر نزدیک‌تر بود. آزمون تست اجرا در مدل‌های EXP و GOM معنی‌دار شد ($p<0/05$) که نشان‌دهنده دقت کمتر این مدل‌ها بود. به‌طور کلی، مدل EXP کینتیک تخمیر شکمبه‌ای خوراک‌های علوفه‌ای را با دقت کمتری پیش‌بینی کرد و بیشترین دقت را نیز مدل FRC داشت.

واژه‌های کلیدی: آزمون تولید گاز، علوفه، مدل‌های غیرخطی، نکویی‌برازش

مقدمه

آزمون تولید گاز به‌منظور بررسی کینتیک هضم خوراک در شکمبه مورد استفاده قرار می‌گیرد و از آنجایی‌که نیاز به تجهیزات گران قیمت ندارد، لذا امروزه به‌عنوان یک روش استاندارد و ارزان قیمت در اکثر آزمایشگاه‌های تغذیه نشخوارکنندگان استفاده می‌شود (Wang *et al.*, 2013). در این روش، ماده خوراکی در داخل مایع شکمبه انکوبه شده و حجم گاز تولیدی در زمان‌های مختلف انکوباسیون مورد اندازه‌گیری قرار گرفته و روند تولید گاز به‌صورت یک منحنی غیرخطی ارائه می‌گردد (Beuvink and Kogut, 1993; Wang *et al.*, 2011). توصیف نتایج (حجم گاز تولید شده در زمان‌های مختلف انکوباسیون) به‌دست آمده از آزمون تولید گاز، از طریق برازش آن‌ها با یک مدل نمایی و غیر خطی صورت می‌گیرد. برای این منظور، ساده‌ترین مدل غیرخطی مورد استفاده، مدل

۱- استادیار گروه علوم دامی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.
۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد تغذیه دام، گروه علوم دامی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.
(*- نویسنده مسئول: Email: zaboli@basu.ac.ir)
DOI:10.22067/ijasr.2022.70783.1028

اکسپوناشیال[1] (EXP) می‌باشد. مدل EXP دارای ساختار غیر زیگموییدی است و یکی از شناخته‌ترین مدل‌ها در پیش‌بینی کینتیک تخمیر در شکمبه می‌باشد (Wang *et al.*, 2011). امّا از آن جاییکه فعالیت میکروب‌ها در داخل شکمبه به‌صورت زیگموییدی است، لذا استفاده از یک مدل غیرزیگموییدی مانند مدل EXP برای تفسیر روند تخمیر آن، سبب ایجاد خطا (افزایش MSE[2]) در تفسیر نتایج پیش‌بینی شده می‌گردد (Dhanoa *et al.*, 2000). بر این اساس، پژوهشگران انواع مدل‌های غیرخطی دیگری را جهت افزایش دقت در پیش‌بینی فراسنجه‌های کینتیک تخمیر شکمبه‌ای مواد خوراکی ارائه داده‌اند (Sahin *et al.*, 2011). مدل گومپرتز[3] (GOM) با یک ساختار زیگموئیدی، اولین بار برای توصیف کینتیک تولید گاز مورد استفاده محققین قرار گرفت (Seker, 2002). مدل ریچارد[4] (RCH) نیز توسط برخی از محققین از قبیل پیت و همکاران (Pitt *et al.*, 1999) و هوهتانن و همکاران (Huhtanen *et al.*, 2008) به‌منظور بررسی کینتیک تخمیر شکمبه مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، یکی دیگر از مدل‌هایی که امروزه برای پیش‌بینی تولید گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد، مدل فرانس[5] (FRC) است که دارای ساختار زیگموییدی بوده و انعطاف‌پذیری زیادی در برازش داده‌های تولید گاز دارد (France *et al.*, 1993). محققین گزارش کرده‌اند که مدل FRC در مقایسه با سایر مدل‌ها دارای دقت نسبتاً زیادی است و بر این اساس، در اکثر مطالعات مربوط به بررسی کینتیک تخمیر شکمبه‌ای خوراک‌های مختلف، از این مدل استفاده شده است (Wang *et al.*, 2011; Zaboli, 2016). لذا با توجه به موارد فوق، به نظر می‌رسد وقتی که یک مدل دارای انعطاف‌پذیری و دقت بیشتری باشد، برازش آن مدل در خوراک‌های مختلف نیز، نتایج دقیق‌تری ارائه خواهد داد.

از آنجایی‌که هر یک از مدل‌های غیرخطی که جهت پیش‌بینی کینتیک تخمیر شکمبه‌ای استفاده می‌شوند، از نظر ساختار ریاضی با یکدیگر تفاوت دارند، لذا فراسنجه‌های پیش‌بینی شده توسط هر یک از این مدل‌ها ممکن است با یکدیگر متفاوت باشند. بر این اساس، تعیین تفاوت موجود در بین این مدل‌ها (دقت مدل‌ها) می‌تواند در انتخاب یک مدل مناسب تأثیرگذار باشد و برای این منظور از ابزارهای خاصی استفاده می‌شود (Peripolli *et al.*, 2014). از جمله این ابزارها می‌توان به آماره‌هایی مانند میانگین مربعات خطا (MSE)، ضریب تعیین[6] (R^2)، انحراف مطلق میانگین باقی‌مانده[7] (RMAD)، میانگین درصد خطا[8] (MPE) و نیز آزمون تست اجرا[9]، فاکتور صحت[10] (AF)، معیار اطلاعات آکائیک[11] (AIC) و معیار اطلاعات بیزی[12] (BIC) اشاره کرد.

پریپولی و همکاران (Peripolli *et al.*, 2014) کینتیک تخمیر شکمبه‌ای جیره‌های مختلف را با استفاده از چند مدل غیرخطی مانند مدل‌های EXP، GOM و FRC بررسی کردند و برای تعیین دقت این مدل‌ها از آماره‌های MSE، R^2، RMAD و MPE استفاده کردند. وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2011) به‌منظور بررسی دقت برخی مدل‌های غیرخطی در پیش‌بینی کینتیک تولید گاز در خوراک‌های علوفه‌ای مختلف، از آزمون تست اجرا و آماره AIC استفاده کردند. در مطالعه دیگری که بر روی کینتیک تخمیر شکمبه-ای علوفه یونجه انجام گرفت، به‌منظور بررسی نکویی برازش و دقت مدل‌های غیر خطی از آزمون تست اجرا و آماره‌های AF، AIC و BIC استفاده شد. لازم به ذکر است که از آماره‌های AF، AIC و BIC برای نشان دادن کیفیت نسبی مدل‌ها و مقایسه دقت آن‌ها استفاده می‌شود (Zaboli, 2016).

علوفه‌ها یکی از اجزای بسیار مهم جیره نشخوارکنندگان محسوب می‌شوند و نقش بسیار مهمی در بهبود روند تخمیر شکمبه‌ای دارند. آگاهی از کینتیک تخمیر شکمبه‌ای علوفه‌ها سبب می‌شود با شناخت بهتری از آن‌ها در جیره غذایی دام‌ها استفاده کنیم (McDonald *et al.*, 1995). تحقیقات مختلفی در خصوص تعیین ارزش غذایی و کینتیک تخمیر شکمبه‌ای علوفه‌ها به‌روش آزمون تولید گاز انجام شده است. امّا در بیشتر این تحقیقات، از مدل نمایی EXP برای این منظور استفاده شده است. با توجه به موارد فوق، در پژوهش حاضر سعی شد تا از علوفه‌های مختلف به‌عنوان نمونه خوراک استفاده شده و نتایج مربوط به کینتیک تولید گاز این‌ها، با استفاده از برخی مدل‌های غیر خطی مورد برازش قرار گیرد و نتایج برازش این مدل‌ها از طریق برخی آماره‌ها و آزمون‌ها مقایسه شود (Korkmaz and Uckades, 2014; Uckardes and Efe, 2014; Wang *et al.*, 2011).

مواد و روش‌ها

۱- نمونه خوراک و نحوه آماده‌سازی آن: در این آزمایش

1- Exponential model (y = A. (1-e -(c.t)))
2- Mean square error
3- Gompertz
4- Richards
5- France

6- Coefficient of determination
7- Residual mean absolute deviation
8- Mean percentage error
9- Run test
10- Accuracy factor
11- Akaike information criterion
12- Bayesian information criterion

از علوفه یونجه (چین اول، دوم و سوم)، علوفه اسپرس، کاه گندم، کاه جو و سیلاژ ذرت به‌عنوان نمونه خوراک استفاده شد. ابتدا درصد ماده خشک و ترکیبات شیمیایی مواد خوراکی (ماده آلی، پروتئین خام، NDF و ADF) با استفاده از روش‌های استاندارد تعیین شد (Van-Soest *et al.*, 1991AOAC, 1995;). سپس، این خوراک‌ها با استفاده از آسیاب رومیزی (Glen Greston، انگلستان) مجهز به الک دو میلی‌متری آسیاب شده و جهت انجام آزمایش مورد استفاده قرار گرفتند.

۲- حیوانات و نحوه آماده‌سازی مایع شکمبه: مایع شکمبه مورد نیاز برای انجام این آزمایش از تعداد سه رأس گوسفند نر نژاد مهربان و مجهز به فیستولای شکمبه‌ای گرفته شد. مایع شکمبه گرفته شده روی هم ریخته شده و بلافاصله در شرایط بی‌هوازی و در داخل فلاسک (در مجاورت آب گرم) به آزمایشگاه منتقل شد. مایع شکمبه با استفاده از پارچه متقال چهار لایه صاف گردید و سپس به‌نسبت ۲:۱ با محلول بافر آماده شده در مجاورت گاز دی اکسید کربن مخلوط و به‌عنوان مایع شکمبه بافری شده مورد استفاده قرار گرفت (Menke and Steingass, 1988).

۳- بررسی کینتیک تولید گاز: به‌منظور بررسی کینتیک تولید گاز، مقدار ۲۰۰ میلی‌گرم ماده خشک از هر یک از مواد خوراکی به داخل ویال‌های شیشه‌ای (در سه تکرار) منتقل و بعد از آن به داخل هر کدام از ویال‌ها مقدار ۳۰ میلی‌لیتر از مایع شکمبه بافری شده اضافه گردید. ویال‌ها بعد از درپوش‌گذاری در داخل حمام بن‌ماری با دمای ۳۹ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. سپس، حجم گاز تولید شده در زمان‌های ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۶، ۲۰، ۲۴، ۳۶، ۴۸، ۷۲، ۹۶، ۱۲۰، ۱۴۴ ساعت پس از انکوباسیون یادداشت شد. به‌منظور تصحیح اثرات مایع شکمبه نیز تعداد دو عدد ویال به‌عنوان بلانک (ویال‌های حاوی مایع شکمبه بافری شده و فاقد نمونه خوراک) نیز در نظر گرفته شد. همچنین به‌منظور افزایش تعداد مشاهدات، آزمون تولید گاز در سه دوره (run) ۱۴۴ ساعته و به‌طور جداگانه تکرار شد.

٤- مدل‌های غیرخطی و نکویی‌برازش داده‌ها: در این مطالعه از چهار مدل غیرخطی جهت پیش‌بینی حجم گاز تولید شده در زمان‌های مختلف انکوباسیون استفاده شد (جدول ۱).

جدول ۱– توصیف مدل‌های ریاضی استفاده شده در این مطالعه

Table 2- Description of mathematical models used in this study

مدل‌ها Models	معادله Equation[1]	فراسنجه ساختاری Shape parameter	دامنه Domain
مدل اکسپونانشیال Exponential (EXP)	$y = A.(1 - e^{-c.t})$	-	$t \geq 0$
مدل گومپرتز Gompertz (GOM)	$y = (A.\ e^{be^{(-c.t)}})$	b	$t \geq 0$
مدل ریچارد Richards (RCH)	$y = A.(1 - e^{-c.t})^{\frac{1}{b}}$	b	$t \geq 0$
مدل فرانس France (FRC)	$y = A.(1 - e^{-(c(t-L)-b(\sqrt{t}-\sqrt{L}))})$	b	$t \geq 0$

[۱]Y: حجم گاز تولید شده در زمان t، A: پتانسیل تولید گاز، c: سرعت تولید گاز، b: فراسنجه ساختاری، t: زمان انکوباسیون و e : عدد نپر (۲/۷۱۸۲۱۸۲۸۴...)

[1]Y: volume of gas at time t, A: asymptotic gas volume, c: rate parameter, b: shape parameter, t: incubation time and e: Napier’s constant (2.718218284…)

ابتدا نتایج به‌دست آمده (حجم گاز تولید شده در هر زمان از انکوباسیون) با استفاده از رویه Nonlinear regression در نرم‌افزار SPSS 16.0 for windows (نسخه ۱۶، سال ۲۰۰۷) به مدل‌های مورد نظر برازش داده شدند و نتایج به‌صورت میلی‌لیتر گاز تولید شده به‌ازای ۲۰۰ میلی‌گرم ماده خشک خوراک به‌دست آمد.

به‌منظور بررسی نکویی‌برازش مدل‌ها از مقادیر میانگین مربعات خطا (MSE)، ضریب تعیین (R^2)، انحراف مطلق میانگین باقی مانده (RMAD) و میانگین درصد خطا (MPE) به‌دست آمده از هر مدل استفاده شد (Peripolli *et al.*, 2014). همچنین، دقت هر یک از مدل‌ها در برازش داده‌ها با استفاده از آزمون تست اجرا (Wang *et al.*, 2011)، فاکتور صحت (Uckardes and Efe, 2014) و آماره‌های معیار اطلاعات آکائیک (Wang *et al.*, 2011) و معیار اطلاعات بیزی (Uckardes and Efe, 2014) مورد بررسی قرار گرفت.

۵- تجزیه آماری داده‌ها: برای مقایسه آماری فراسنجه‌های پیش‌بینی شده توسط هر مدل (فراسنجه‌های A و c) و نیز فراسنجه‌های نکویی‌برازش (MSE، R^2، RMAD و MPE) مربوط به هر کدام از مدل‌ها، از رویه GLM برنامه SAS (نسخه 9.1، سال ۱۹۹۹) استفاده شد (SAS, 1999). مدل آماری به‌صورت $Y_{ij} = \mu + M_i + R_j + e_{ij}$ بود که در آن Y_{ij}: متغیر وابسته، μ: میانگین، M_i: اثر مدل، R_j: اثر دوره (run) و e_{ij}: خطای باقی‌مانده بود. مقایسه

میانگین‌ها نیز با استفاده از آزمون توکی در سطح خطای پنج درصد انجام گرفت.

نتایج و بحث

نتایج مربوط به ترکیب شیمیایی مواد خوراکی استفاده شده، در جدول ۲ ارایه شده است. مطابق جدول فوق، درصد ماده خشک علوفه‌های خشک استفاده شده در این آزمایش، در محدوده ۹۱/۴۳ تا ۹۴/۳۶ درصد و در سیلاژ ذرت (به‌صورت تازه) ۲۵/۳۴ درصد بود. همچنین، درصد ماده آلی نیز در نمونه‌های خوراکی در محدوده ۹۰/۹۸ تا ۹۳/۴۲ درصد بود. درصد پروتئین خام، NDF و ADF نمونه‌ها نیز در حد متعارف و با نتایج سایر محققین هم‌خوانی داشت (Moradi and Zaboli, 2018; McDonald *et al.*, 1995; Zaboli and Maleki, 2016Sahin *et al.*, 2011 ;). این وضعیت نشان داد که مواد علوفه‌ای مورد استفاده، از نظر نحوه خشک شدن و احتمال عدم آلودگی به خاک و ذرات خارجی، در وضعیت مناسبی بوده‌اند (McDonald *et al.*, 1995).

جدول ۲- ترکیب شیمیایی مواد خوراکی مورد استفاده در این آزمایش (درصد ماده خشک)

Table 2-Chemical composition of feed-stuffs used in this study (% DM)

ماده خوراکی Feed-stuff	ماده خشک DM	ماده آلی OM	پروتئین خام CP	ان دی اف NDF	ای دی اف ADF
علوفه یونجه (چین اول) Alfalfa hay (first cutting)	91.43	90.98	12.93	48.31	36.62
علوفه یونجه (چین دوم) Alfalfa hay (second cutting)	92.76	91.47	16.60	30.83	27.46
علوفه یونجه (چین سوم) Alfalfa hay (third cutting)	93.31	91.43	14.37	51.02	38.06
علوفه اسپرس Sainfoin hay	92.77	91.46	12.83	46.07	36.68
کاه گندم Wheat straw	94.36	90.10	3.52	70.11	45.95
کاه جو Barley straw	94.89	91.82	4.08	72.29	41.68
سیلاژ ذرت Corn silage	25.34	93.42	8.46	55.28	35.21

ماده خشک (DM)، ماده آلی (OM)، پروتئین خام (CP)، ان دی اف (NDF) و ای دی اف (ADF)

Dry matter (DM), organic matter (OM), crude protein (CP), neutral detergent fiber (NDF) and acid detergent fiber (ADF).

نتایج مربوط به فراسنجه‌های کینتیک تخمیر شکمبه‌ای پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس جدول فوق، مقدار پتانسیل تولید گاز (A) پیش‌بینی شده توسط مدل FRC تفاوت معنی‌داری با مدل EXP داشت (p<۰/۰۵). امّا تفاوت بین مدل‌های EXP، GOM و RCH معنی‌دار نبود. سرعت تولید گاز (c) پیش‌بینی شده توسط مدل‌های مورد مطالعه تفاوت معنی‌داری با هم داشتند و مقدار آن در مدل GOM بیشترین مقدار (۰/۰۶۶ میلی‌لیتر بر ساعت) و در مدل FRC کمترین مقدار (۰/۰۱۷ میلی‌لیتر بر ساعت) بود (p<۰/۰۵).

فراسنجه ساختاری (b) فقط در مدل‌های GOM، RCH و FRC برآورد شد (مدل EXP فاقد فراسنجه b بود). لازم به ذکر است که فراسنجه b جهت تصحیح ساختار منحنی تولید گاز به یک مدل غیرخطی اضافه می‌شود تا مدل مورد نظر با مقادیر مشاهده شده (حجم گاز تولید شده در زمان‌های مختلف انکوباسیون) بهتر برازش شود و لذا وجود آن در یک مدل غیر خطی، فاقد ارزش بیولوژیکی بوده و فقط باعث تصحیح ساختار منحنی تولید گاز می‌شود. به همین دلیل به آن فراسنجه ساختاری می‌گویند و مقدار عددی این فراسنجه با توجه به نوع ساختار معادله ریاضی هر مدل، متفاوت می‌باشد. بر این اساس، مقایسه آماری مقدار آن در مدل‌های مختلف صحیح نمی‌باشد (Huhtanen *et al.*, 2008). همچنین، تغییر ساختار منحنی تولید گاز در مدل‌های مورد مطالعه، ممکن است شیب منحنی تولید گاز (سرعت تولیدگاز، c) مربوط به آن مدل را تغییر دهد. بر این اساس، مطابق نتایج جدول ۳، مقدار سرعت تولید گاز (c) پیش‌بینی شده توسط مدل‌های مورد مطالعه تفاوت معنی‌داری نشان دادند (p<۰/۰۵).

مشابه نتایج ما، در مطالعه‌ای که به‌منظور بررسی کینتیک تولید گاز در علوفه یونجه با استفاده از مدل‌های EXP و FRC انجام شد، پتانسیل تولید گاز (A) پیش‌بینی شده توسط مدل FRC به‌طور معنی‌داری بیشتر از مدل EXP بود. همچنین، سرعت تولید گاز (c)

پیش‌بینی شده توسط مدل FRC به‌طور معنی‌داری کمتر از مدل EXP بود (Zaboli, 2016). در مطالعه دیگری که به‌وسیله مرادی و زابلی (Moradi and Zaboli, 2018) به‌منظور بررسی کینتیک تخمیر شکمبه‌ای تفاله گوجه‌فرنگی به‌روش آزمون تولید گاز و با استفاده از مدل‌های EXP، GOM و RCH انجام شد، مقدار A پیش‌بینی شده توسط مدل‌های فوق تفاوت معنی‌داری نشان ندادند. امّا مقدار c در مدل RCH به‌طور معنی‌داری کمتر از مدل‌های EXP و GOM بود.

برخلاف نتایج ما، وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2011) با بررسی تعداد ۲۳ منحنی تولید گاز ۴۸ ساعته در علوفه‌های مختلف و با استفاده از مدل‌های EXP، GOM و FRC گزارش کردند که مقدار A پیش‌بینی شده توسط مدل FRC تفاوت معنی‌داری با مدل EXP و GOM نداشت. علت تفاوت نتایج این تحقیق با مطالعه حاضر، احتمالاً به‌دلیل مدت زمان کمتر انکوباسیون (۴۸ ساعت در مقایسه با ۱۴۴ ساعت) می‌تواند باشد. لازم به ذکر است که در تعیین ارزش غذایی مواد خوراکی مختلف، پیش‌بینی کینتیک تخمیر شکمبه‌ای خوراک‌ها (پتانسیل تولید گاز و سرعت تولید گاز) بسیار مهم می‌باشد (Seker, 2002). پیش‌بینی این مقادیر در مواد خوراکی مختلف به عوامل متعددی از قبیل نوع خوراک، اندازه ذرات، نوع جمعیت میکروبی مایع شکمبه، زمان انکوباسیون و نیز نوع مدل غیر خطی استفاده شده بستگی دارد. تغییر هر یک از عوامل فوق می‌تواند نتایج متفاوتی را ارایه دهد. لذا انتظار پیش‌بینی مقادیر ثابت و مشابه برای فراسنجه‌های A و c در آزمایشات مختلف امکان پذیر نمی‌باشد.

جدول ۳– مقایسه فراسنجه‌های کینتیک تخمیر شکمبه‌ای برآورد شده به‌وسیله مدل‌های مورد مطالعه

Table 3- Comparison of the ruminal fermentation kinetic parameters estimated by the studied models

فراسنجه‌ها Parameters	مدل اکسپوننشیال EXP	مدل گومپرتز GOM	مدل ریچاردز RCH	مدل فرانس FRC	مقدار p p-value
A	100.18 [b]	99.50 [b]	102.90 [ab]	104.68 [a]	0.0007
c	0.053 [b]	0.066 [a]	0.036 [c]	0.017 [d]	<.0001
b	-	-1.87	1.36	0.22	-
L	-	-	-	0.41	-

مدل‌ها به‌ترتیب EXP: اکسپوننشیال، GOM: گومپرتز، RCH: ریچاردز و FRC: فرانس بودند.

A: پتانسیل تولید گاز (میلی‌لیتر به‌ازای ۲۰۰ میلی‌گرم ماده خشک)، b: فراسنجه ساختاری، c: سرعت تولید گاز (میلی‌لیتر بر ساعت) و L: زمان تأخیر (ساعت)

میانگین‌های دارای حروف متفاوت در هر ردیف دارای تفاوت معنی‌دار در سطح خطای پنج درصد در آزمون توکی هستند.

Models were EXP: Exponential, GOM: Gompertz, RCH: Richards and FRC: France.

A: asymptotic gas volume (ml/200mg DM), b: shape parameter, c: rate of gas production ($ml.h^{-1}$) and L: lag time (h).

Mean within rows followed by different superscripts are statistically different (P<0.05) by the test of Turkey's.

نتایج مربوط به فراسنجه‌های نکویی‌برازش مدل‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. مطابق جدول فوق، مقدار MSE به‌دست آمده در مدل EXP بیشترین و در مدل FRC و RCH کمترین مقدار بود (p<۰/۰۵). لازم به ذکر است که از نظر آماری، یک رابطه عکس بین مقادیر MSE و ضریب تعیین (R^2) وجود دارد و هر گاه مقدار MSE به‌دست آمده در یک مدل بیشتر باشد، مقدار R^2 آن کمتر خواهد بود و برعکس. با توجه به موارد ذکر شده، مقدار R^2 در مدل EXP کمترین و در مدل‌های FRC و RCH بیشترین مقدار بود که با نتایج مربوط به MSE به‌دست آمده هم‌خوانی داشت (p<۰/۰۵).

مشابه نتایج ما، بررسی کینتیک تولید گاز در جیره‌های حاوی ۶۰ درصد یونجه با سطوح مختلف دانه ذرت و گلیسرول با استفاده از مدل‌های EXP، GOM و FRC نشان داد که مقدار MSE در مدل EXP در مقایسه با سایر مدل‌ها بیشتر و مقدار R^2 آن کمتر بود که نشان‌دهنده دقت کمتر مدل EXP در مقایسه با مدل‌های فوق بود (Peripolli *et al.*, 2014). همچنین، وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2011) با بررسی تعداد ۲۳ منحنی تولید گاز در علوفه‌های مختلف با استفاده از مدل‌های EXP، GOM و FRC گزارش کردند که مدل EXP دارای بیشترین مقدار MSE و کمترین مقدار R^2 در بین مدل‌های مورد بررسی بود.

هوهتانن و همکاران (Huhtanen *et al.*, 2008) با بررسی کینتیک تولید گاز در تعداد ۱۵ نوع سیلاژ مختلف با استفاده از مدل‌های EXP، GOM، RCH و FRC گزارش کردند که بر اساس مقادیر MSE و R^2 به‌دست آمده، مدل‌های FRC و RCH دارای بیشترین دقت و مدل‌های EXP و GOM دارای کمترین دقت در پیش‌بینی کینتیک تولید گاز در مواد خوراکی مورد آزمایش بودند.

نتایج مشابهی هم توسط سایر محققین گزارش شده است که نشان‌دهنده دقت کمتر مدل EXP در مقایسه با مدل‌های مورد مطالعه می‌باشد (Beuvink and Kogut, 1993). گزارش شده است که اگر مقدار MSE و R^2 در یک مدل به‌ترتیب زیاد و کم باشد، نشان‌دهنده دقت کمتر مدل مربوطه می‌باشد (Korkmaz and Uckades, 2014؛ Zaboli *et al.*, 2021). بر این اساس، مشخص شد که مدل EXP به خاطر داشتن بیشترین مقدار MSE و کمترین مقدار R^2، دارای کمترین دقت و مدل‌های FRC و RCH دارای بیشترین دقت در پیش‌بینی کینتیک تخمیر شکمبه‌ای بودند.

مقدار RMAD یک شاخص مناسب برای بررسی دقت و نکـویی برازش مدل‌های غیر خطی در پیش‌بینی کینتیک تولید گاز می‌باشـد و هر چقدر مقدار عددی این آماره کمتر باشد (به عدد صـفر نزدیک‌تـر باشد)، نشان‌دهنده دقـت بیشـتر آن مـدل اسـت (Peripolli *et al.*, 2014; Zaboli *et al.*, 2021). مطـابق جـدول ۴، مقـدار آمـاره RMAD به‌دست آمـده در مـدل‌هـای مـورد مطالعـه دارای تفـاوت معنی‌داری بود و مقدار آن در مـدل EXP بیشـترین و در مـدل FRC کمترین مقدار بود (p<۰/۰۵). بر این اساس، مدل FRC با دارا بـودن کمترین مقدار RMAD دارای بیشـترین دقـت و مـدل EXP بـا دارا بودن بیشترین مقـدار RMAD دارای کمتـرین دقـت در پـیش‌بینـی کینتیک تولید گاز بود (p<۰/۰۵).

مقدار آماره میانگین درصد خطا (MPE) نشان‌دهنده بیش‌برآورد و یا کم‌برآورد شدن مقادیر پیش‌بینی شده (نسـبت بـه مقـادیر مشـاهده شده) توسط یک مدل می‌باشد. به عبارت دیگر، هر چقدار مقدار آمـاره MPE در یک مدل، به عدد صفر نزدیک‌تر باشد، نشـان‌دهنـده دقـت بیشتر آن مدل می‌باشد و هر چقدر مقدار آن از عـدد صـفر (بـه‌سـمت منفی و یا مثبت) فاصله داشته باشد، نشان‌دهنـده ضـعف آن مـدل در پیش‌بینی نتایج می‌باشد (Peripolli *et al.*, 2014). مطابق جدول ۴، مقـدار آمـاره MPE در بـین مـدل‌هـا دارای تفـاوت معنـی‌داری بـود (p<۰/۰۵) و مقدار آن در مدل‌های FRC و RCH در مقایسه با سـایر مدل‌ها، به عدد صفر نزدیک‌تر بود که نشان‌دهنده دقت بیشتر ایـن دو مدل در برازش داده‌ها بود. امّا مقدار آماره MPE در مـدل‌هـای EXP (۲/۸۸) و GOM (۲/۴۷–) از عدد صفر فاصله بیشـتری داشـتند کـه نشان‌دهنده ضعف این مدل‌ها در پیش‌بینی کینتیک تولید گاز بود.

مشابه نتایج ما، در مطالعه‌ای که به‌منظور بررسی کینتیک تخمیـر شکمبه‌ای تفاله لیموترش بـا اسـتفاده از مـدل‌هـای EXP، GOM و RCH انجام شد، مقدار RMAD در مدل EXP بـه‌طـور معنـی‌داری بیشتر از مدل‌های GOM و RCH بود. همچنین، مقدار آمـاره MPE در پـژوهش فـوق در مـدل‌هـای EXP، GOM و RCH بـه‌ترتیـب ۴/۹۲۱، ۱/۴۷۱– و ۰/۱۵۳– بود و بر ایـن اسـاس مـدل EXP دارای کمترین دقت در پیش‌بینی کینتیک تخمیر شکمبه‌ای در بین مدل‌های مـورد مطاللعـه بـود (Zaboli and Moradi, 2019). پریپـولی و همکاران (Peripolli *et al.*, 2014) با بررسی کینتیک تولیـد گـاز در جیره‌های حاوی ۶۰ درصـد یونجـه بـا سـطوح مختلـف دانـه ذرت و گلیسرول گزارش کردند که مقدار RMAD و MPE در مـدل EXP به‌ترتیب ۴/۰۳ و ۱۵/۰۴ به‌دست آمد که به‌طـور معنـی‌داری بیشـتر از مدل FRC بود و نشان‌دهنده نکویی‌برازش ضعیف‌تـر مـدل EXP در مقایسه با مدل FRC بود (Peripolli *et al.*, 2014).

جدول ٤– مقایسه فراسنجه‌های نکویی‌برازش در مدل‌های مورد مطالعه

Table 4- Comparison of goodness of fit parameters in the studied models

فراسنجه‌ها Parameters	مدل اکسپوننشیال EXP	مدل گومپرتز GOM	مدل ریچاردز RCH	مدل فرانس FRC	مقدار p p-value
میانگین مربعات خطا MSE	15.11 [a]	9.98 [b]	3.02 [c]	1.51 [c]	<.0001
ضریب تعیین R^2	0.984 [c]	0.990 [b]	0.997 [a]	0.999 [a]	<.0001
انحراف مطلق میانگین باقی‌مانده RMAD	2.88 [a]	2.30 [b]	1.14 [c]	0.80 [d]	<.0001
میانگین درصد خطا MPE	2.30 [a]	-2.47 [c]	0.48 [b]	0.32 [b]	<.0001

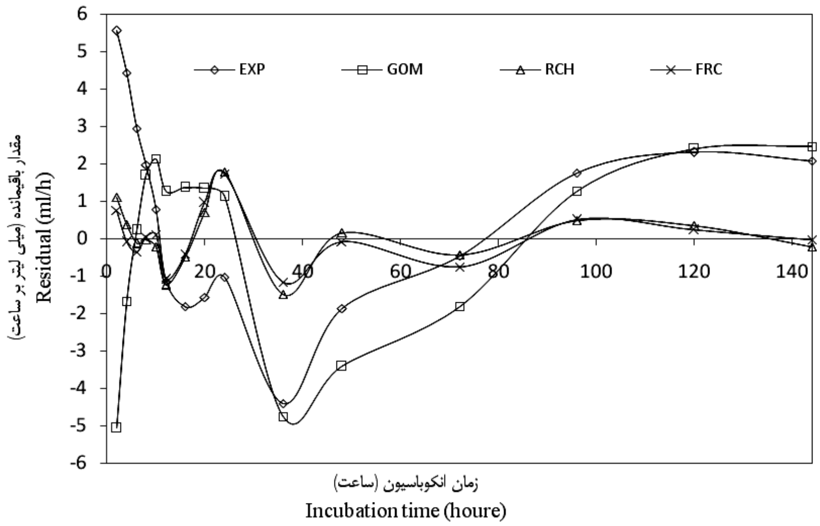
میانگین‌های دارای حروف متفاوت در هر ردیف دارای تفاوت معنی‌دار (p<۰/۰۵) بر اساس آزمون توکی هستند.

MSE: mean squares errors, R^2: coefficient of determination, RMAD: residual mean absolute deviation, MPE: mean percentage error.
Mean within rows followed by different superscripts are statistically different (P<0.05) by the test of Turkey's.

نمودار مربوط به گستردگی مقادیر باقی‌مانده (تفاوت بـین مقـادیر پیش‌بینی شده با مقادیر مشاهده شـده، مقـادیر بـاقی‌مانـده) در طـول زمان انکوباسیون در مدل‌های مـورد مطالعـه در شـکل ۱ ارائـه شـده است. همـان‌طـور کـه در شـکل فـوق مشـاهده مـی‌شـود، بیشـترین گستردگی مقادیر باقی‌مانده در فاز ابتدایی انکوباسـیون اتفـاق افتـاد و این گستردگی در مدل‌های EXP و GOM بیشتر از مدل‌های RCH و FRC بود. همچنین در مدل‌های EXP و GOM، در مرحله میـانی انکوباسیون مقدار گاز پیش‌بینی شده کمتر از مقدار مشاهده شده بـود. در مرحله پایانی نیز مقدار گاز پیش‌بینی شده به‌وسیله ایـن دو مـدل، بیشتر از مقدار مشاهده شده بود که همه این‌ها نشان‌دهنده دقت کمتر مدل‌هـای EXP و GOM بـود. مـدل‌هـای RCH و FRC وضـعیت بهتری از این نظر داشتند و مقدار گاز پیش‌بینی شده در این‌ها (تقریبـاً در تمام زمان انکوباسیون) بسیار نزدیک‌تر به مقادیر مشاهده شده بـود که نشان‌دهنده دقت بیشتر این دو مدل در پیش‌بینـی کینتیـک تولیـد گاز بود.

مطابق نظر محققین، نمودار گستردگی مقادیر باقی‌مانده در طـول

زمان انکوباسیون، نکویی‌برازش مربوط به هر مدل را به‌خوبی نشان می‌دهد (Peripolli *et al.*, 2014). بر این اساس، زابلی (Zaboli, 2016) گزارش کرد که گستردگی مقادیر باقی‌مانده در طول زمان انکوباسیون در مدل FRC بسیار کمتر از مدل EXP بود که نشان‌دهنده نکویی برازش بهتر مدل FRC بود. همچنین در تحقیق دیگری که بر روی کینتیک تخمیر شکمبه‌ای علوفه یونجه انجام شد، مشخص گردید که مقادیر باقی‌مانده در طول زمان انکوباسیون در مدل‌های EXP و GOM، دارای گستردگی زیادی بودند که نشان‌دهنده دقت کمتر این دو مدل در پیش‌بینی کینتیک تخمیر شکمبه‌ای علوفه یونجه بود که با نتایج ما هم‌خوانی دارد (Moradi and Zaboli, 2018).



شکل ۱- گستردگی مقادیر باقی‌مانده در طول زمان انکوباسیون بعد از برازش مدل‌ها (مدل‌ها عبارت بودند از اکسپوناشیال (EXP)، گومپرتز (GOM)، ریچارد (RCH) و فرانس (FRC))

Figure 1- Residual dispersion during incubation period after fitting the models (Models were Exponential (EXP), Gompertz (GOM), Richards (RCH) and France (FRC))

نتایج مربوط به آزمون تست اجرا در جدول ۵ ارائه شده است. بر اساس این آزمون، روند پراکندگی سیستمیک خطای آزمایشی (تفاوت بین مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر مشاهده شده در هر مدل، مقادیر باقی‌مانده) را می‌توان به‌طور وضوح مورد بررسی قرار داد (Dhanoa *et al.*, 2000). به عبارت دیگر، در یک سری اعداد متوالی، هر یکبار تغییر فاز اعداد (تغییر علامت اعداد از + به − و یا از − به +)، یک اجرا (run) محسوب می‌شود. هر چقدر حجم گاز پیش‌بینی شده در ساعات مختلف انکوباسیون به‌وسیله یک مدل با دقت بیشتری صورت گیرد، مقادیر باقی‌مانده مربوط به آن مدل، به‌طور تصادفی در طول منحنی تولید گاز پراکنده شده و لذا مقادیر باقی‌مانده دارای تعداد اجرای بیشتری خواهند بود و بر این اساس آن مدل نکویی‌برازش بهتری خواهد داشت (Zaboli *et al.*, 2021). به‌عبارت دیگر، هر چقدر تعداد اجراها در مقادیر باقی‌مانده در یک مدل بیشتر باشد، نشان‌دهنده آن است که مقادیر پیش‌بینی شده توسط آن مدل، با مقادیر مشاهده شده بهتر برازش شده است و لذا، مقادیر باقی‌مانده در آن مدل، دارای توزیع تصادفی در طول منحنی تولید گاز بوده و در نهایت، مدل دارای نکویی‌برازش بهتری می‌باشد (Korkmaz and Uckades, 2014).

طی گزارشی اعلام شد، تعداد اجرای کمتر در یک مدل نشان‌دهنده آن است که در آن مدل بیش‌برآورد و یا کم‌برآورد اتفاق افتاده است. درحالی‌که تعداد اجرای بیشتر، نشان‌دهنده پراکندگی تصادفی مقادیر باقی‌مانده (خطاها) بوده و لذا، مدل مورد نظر دارای نکویی-برازش بهتری است (Dhanoa *et al.*, 2000).

مطابق جدول ۵، تعداد اجراهای به‌دست آمده از ۶۳ منحنی تولید گاز که برای برازش هر مدل استفاده شده بود، در چهار دسته تقسیم شدند. این دسته‌ها شامل تعداد اجرای ۳ ≥، ۵-۴، ۷-۶ و ۸ ≤ بودند. مطابق جدول ۵، در مدل EXP، توزیع بیشتر منحنی‌ها در دسته تعداد اجرای ۳ ≥ بود (۵۴ منحنی از ۶۳ منحنی) که نشان‌دهنده ضعف مدل EXP در برازش داده‌ها بود. وضعیت مدل GOM در این خصوص بهتر از مدل EXP بود و توزیع بیشتر منحنی‌ها در دسته تعداد اجرای ۵-۴ قرار داشتند (۵۹ منحنی از ۶۳ منحنی). امّا در مدل‌های RCH و FRC توزیع بیشتر منحنی‌ها به‌ترتیب در دسته اجرای ۷-۶ و ۸ ≤ قرار گرفت که نشان‌دهنده دقت بالاتر این دو مدل در مقایسه با مدل-های EXP و GOM بود.

مطابق جدول ۵، آزمون تست اجرا در مدل‌های EXP و GOM معنی‌دار شد (p<۰/۰۵). امّا در مدل‌های RCH و FRC این آزمون معنی‌دار نبود (p>۰/۰۵). معنی‌دار شدن آزمون تست اجرا در یک مدل، نشان‌دهنده آن است که ترتیب داده‌ها (مقادیر باقی‌مانده) در طول منحنی تولید گاز دارای توزیع تصادفی نیستند و لذا، نوعی خطای سیستمیک در آن مدل وجود دارد که نشان‌دهنده دقت کمتر آن مدل است (Wang *et al.*, 2011). علت وجود خطای سیستماتیک، به‌دلیل عدم توزیع تصادفی مقادیر باقی‌مانده (تفاوت مقادیر مشاهده شده با مقادیر پیش‌بینی شده در هر کدام از ساعات انکوباسیون در طول منحنی تولید گاز) می‌باشد. در مطالعه حاضر، در مدل‌های EXP و GOM در تعداد بیشتری از منحنی‌ها (به‌ترتیب ۴۴ و ۵۳ منحنی از مجموع ۶۳ منحنی) آزمون تست اجرا معنی‌دار شد (p<۰/۰۵) که نشان‌دهنده این موضوع بود که در این منحنی‌ها نوعی خطای سیستمیک وجود دارد و بر این اساس، مدل‌های EXP و GOM در پیش‌بینی کینتیک تولید گاز از دقت خوبی برخوردار نبودند. امّا در مدل‌های RCH و FRC، با توجه به این که در تعداد بیشتری از منحنی‌ها (به‌ترتیب ۵۰ و ۶۳ منحنی از مجموع ۶۳ منحنی) آزمون تست اجرا معنی‌دار نشد، لذا در این منحنی‌ها، مقادیر باقی‌مانده در طول منحنی تولید گاز دارای توزیع تصادفی بودند و بر این اساس، مدل‌های RCH و FRC دارای دقت بیشتری در پیش‌بینی کینتیک تولید گاز بودند.

مشابه نتایج ما، دانوا و همکاران (Dhanoa *et al.*, 2000) گزارش کردند که از مجموع ۲۱۶ منحنی تولید گاز مربوط به خوراک‌های مختلف، تعداد ۹۱ و ۹۲ درصد منحنی‌ها به‌ترتیب در مدل‌های EXP و GOM در دسته اجرای ۵ ≤ بودند که نشان‌دهنده دقت کمتر این مدل‌ها بود. همچنین، زابلی (Zaboli, 2016) گزارش کرد که در بررسی منحنی تولید گاز علوفه یونجه که با استفاده از مدل‌های مختلف از جمله مدل EXP و FRC انجام گرفت، تعداد ۸۳ درصد منحنی‌ها در مدل EXP در دسته اجرای ۴ ≤ توزیع شدند. درحالی‌که در مدل FRC تعداد ۶۷ درصد منحنی‌ها در دسته اجرای ۸–۷ توزیع شدند که نشان‌دهنده دقت بیشتر مدل FRC (در مقایسه با مدل EXP) در پیش‌بینی کینتیک تخمیر شکمبه‌ای علوفه یونجه بود.

جدول ۵- نتایج آزمون تست اجرا و توزیع منحنی‌های تولید گاز بر اساس تعداد اجراها در مدل‌های مورد مطالعه

Table 5- Run test results and distribution of gas production curves based on numbers of run in the studied models

	مدل اکسپوناشیال EXP	مدل گومپرتز GOM	مدل ریچارد RCH	مدل فرانس FRC
توزیع منحنی‌ها بر اساس تعداد اجراها (در همه ۶۳ منحنی) Distribution of curves according to the number of runs (total curve=63)				
تعداد اجراهای کمتر از سه ≤ 3	54	0	0	0
تعداد اجراهای بین چهار تا پنج 4-5	6	59	20	10
تعداد اجراهای بین شش تا هفت 6-7	3	4	33	22
تعداد اجراهای بیشتر از هشت ≥ 8	0	0	10	31
توزیع منحنی‌ها بر اساس معنی‌دار بودن (p<۰/۰۵) و معنی‌دار نبودن (p>۰/۰۵) نتایج تست اجرا (در همه ۶۳ منحنی) Distribution of the curves according to the significant (p<0.05) and non-significant (p>0.05) of run test results (total curve=63)				
معنی‌دار شده Significant	44	53	13	0
معنی‌دار نشده Non-significant	19	10	50	63

نتایج مربوط به آماره‌های فاکتور صحت (AF)، معیار اطلاعات آکائیک (AIC) و معیار اطلاعات بیزی (BIC) در جدول ۶ ارائه شده است. آماره‌های AF، AIC و BIC یک شاخص مناسب برای نشان دادن کیفیت نسبی مدل‌ها و انتخاب بهترین آن‌ها از نظر نکویی‌برازش می‌باشد و اگر مقدار آماره‌های فوق در یک مدل کمتر از سایر مدل‌ها باشد، آن مدل به‌عنوان دقیق‌ترین مدل از نظر نکویی‌برازش انتخاب می‌شود (Zaboli, 2016). مطابق جدول ۶، مقدار آماره‌های فوق در مدل FRC کمترین و در مدل EXP بیشترین مقدار بود و این نشان داد که در بین مدل‌های مورد مطالعه، مدل‌های FRC و EXP به‌ترتیب بیشترین و کمترین دقت را در پیش‌بینی کینتیک

تولید گاز داشتند. وضعیت مدل RCH هم در این خصوص، بهتر از مدل GOM بود. در مطالعه‌ای که بر روی کینتیک تولید گاز سیلاژ ذرت انجام گرفت، آماره AIC در مدل‌های EXP و RCHبه‌ترتیب ۱۸/۶۸۶ و ۱۴/۲۲۲ بود که نشان‌دهنده نکویی‌برازش ضعیف‌تر مدل EXP در مقایسه با مدل RCH بود (Zaboli and Maleki. 2016).

زابلی (Zaboli, 2016) با بررسی کینتیک تخمیر شکمبه‌ای علوفه یونجه با استفاده از مدل‌های EXP و FRC گزارش کرد که مقدار آماره‌های AF، AIC و BIC در مدل EXP بیشتر از مدل FRC بود که مشابه نتایج ما، نشان‌دهنده دقت کمتر مدل EXP بود.

جدول ٦- آماره‌های فاکتور صحت، معیار اطلاعات آکائیک و معیار اطلاعات بیزی بعد از برازش مدل‌های مورد مطالعه

Table 6- Accuracy factor, Akaike information criterion and Bayesian information criterion statistics after fitting the studied

فراسنجه‌ها Parameters	مدل اکسپونانشیال EXP	مدل گومپرتز GOM	مدل ریچاردز RCH	مدل فرانس FRC
فاکتور صحت (AF) Accuracy factor	52.38	18.98	4.95	2.85
معیار اطلاعات آکائیک (AIC) Akaike information criterion	42.91	43.17	36.03	15.87
معیار اطلاعات بیزی (BIC) Bayesian information criterion	40.15	37.63	17.62	10.04

نتیجه‌گیری کلی

نتایج نشان داد که مدل‌ها از نظر پیش‌بینی پتانسیل تولید گاز (A) دارای تفاوت معنی‌دار بودند. مدل‌های FRC و RCH نسبت به مدل‌های EXP و GOM دارای نکویی‌برازش بهتری بودند و کینتیک تخمیر شکمبه‌ای خوراک‌های علوفه‌ای را با دقت بیشتری پیش‌بینی کردند. در بین مدل‌های مورد مطالعه، مدل EXP دارای کمترین دقت و مدل FRC دارای بیشترین دقت بود.

References

1. AOAC. (1995). Official Methods of Analysis, 16th ed. Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA.
2. Beuvink, J. M., & Kogut, J. (1993). Modeling gas production kinetics of grass silages incubated with buffered ruminal fluid. *Journal of Animal Science*, *71*(4), 1041-1046. DOI: 10.2527/1993.7141041x
3. Dhanoa, M. S., Lopez, S., Dijkstra, J., Davies, D. R., Sanderson, R., Williams, A. B., Zileshi, Z., & France, J. (2000). Estimating the extent of degradation of ruminant feeds from a description of their gas production profiles observed *in vitro*: Comparison of models. *British Journal of Nutrition*, *83*, 131–142. DOI: 10.1017/s0007114500000179
4. France, J., Dhanoa, M. S., Theodorou, M. K., Lister, M. K., Davies, D. R., & Isac, D. (1993). A model to interpret gas accumulation profiles associated with *in vitro* degradation of ruminant feeds. *Journal of Theoretical Biology*, *163*, 99–111. DOI:10.1006/jtbi.1993.1109
5. Huhtanen, P., Seppälä, A., Ahvenjärvi, S., & Rinne, M. (2008). Prediction of *in vivo* neutral detergent fiber digestibility and digestion rate of potentially digestible neutral detergent fiber: Comparison of models. *Journal of Animal Science*, *86*, 2657–2669. DOI:10.2527/jas.2008-0894
6. Korkmaz, M., & Uckades, F. (2014). An alternative robust model for *in situ* degradation studies. *Iranian Journal of Applied Animal Science*, *4*(1), 45-51.
7. McDonald, P., Edwards, R. A., Greenhalgh, J. F. D., & Morgan, C. A. (1995). Animal nutrition. Longman Scientific and T echnical, New York. USA.
8. Menke, K. H., & Steingass, H. (1988). Estimation of the energetic feed value obtainedfrom chemical analysis *in vitro* gas production using rumen fluid. *Animal Research and Development*, *28*, 7-55.
9. Moradi, S., & Zaboli, Kh. (2018). Prediction of gas production kinetic in tomato pulp using some nonlinear models. Eleventh National Congress on Biosystem, Engineering and Mechanization, university of Bu Ali Sina, Hamadan. Iran (In Persian)
10. Moradi, S., & Zaboli, Kh. (2018). Prediction of ruminal fermentation kinetics of alfalfa forage using some nonlinear models. Eighth Iranian Animal Science Congress, university of Kurdestan, Sanandaj, Iran (In Persian).
11. Peripolli, V., Prates, E. R., Barcellos, J. O. J., McManus, C. M., Wilbert, C. A., BracciniNeto, J., Camargo, C. M., & Lopes, R. B. (2014). Models for gas production adjustment in ruminant diets containing crude glycerol. *Livestock Research for Rural Development 26* (2), from http://www.lrrd.org/lrrd26/2/peri26028.htm.
12. Pitt, R. E., Cross, T. L., Pell, A. N., Schofield, P., & Doane, P. H. (1999). Use of *in vitro* gas production models in ruminal Kinetics. Mathematical Biosciences, 159(2), 145-163. DOI: 10.1016/s0025-5564(99)00020-6

13. Sahin, M., Uckardes, F., Canbolat, O., Kamalak, A., & Atalay, A. I. (2011). Estimation of partial gas production times of some feedstuffs used in ruminant nutrition. Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi Journal, 17, 731-734.
14. SAS, (1999). The SAS system for windows.Release 8.0.1.SAS Institutue Inc, Cary, USA.
15. Seker, E. (2002). The determination of the energy values of some ruminant feeds by using digestibility trial and gas test. *Revue de Medecine Veterinaire*, *153*(5), 323-328.
16. Uckardes, F., & Efe, E. (2014). Investigation on the usability of some mathematical models in *in vitro* gas production techniques. *Slovak Journal of Animal Science*, *47* (3), 172-179.
17. Van-Soest, P. J., Robertson, J. B., & Lewis, B. A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, *74*, 3583–3597.
18. Wang, M., Tang, S. X., & Tan, Z. L. (2011). Modeling *in vitro* gas production kinetics: Derivation of Logistic-Exponential (LE) equations and comparison of models. *Animal Feed Science and Technology*, *165*, 137-150. DOI: https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2010.09.016
19. Wang, M., Sun, X. Z., tang, S. X., Tan, Z. L., & Pacheco, (2013). Deriving fractional rate of degradation of logistic-exponential (LE) model to evaluate early *in vitro* fermentation. *Animal*, *7*(6), 920-929. DOI: https://doi.org/10.1017/S1751731112002443
20. Zaboli, Kh., Kalvandy, S., & Malecky, M. 2021. The accuracy of some models to estimate the coefficients of gas production test in corn silage. *Iranian Journal of Animal Science Research*, *12*(4), 467-479 (In Persian) DOI:10.22067/ijasr.v12i4.80666
21. Zaboli, Kh., & Maleki, M. (2016). Prediction of ruminal fermentation kinetic of corn silage using some models by *in vitro* method. *Journal of Ruminant Research*, *4*(3), 117-134. (In Persian) DOI: 10.22069/ejrr.2017.11674.1475
22. Zaboli, Kh., & Moradi, S. (2019). Predicting of gas production kinetic in lemon pulp using some nonlinear models. Fifth National Conference on Livestock, Poultry and Aquaculture Management, Shahid Bahonar university, Kerman. Iran (In Persian)
23. Zaboli, Kh. (2016). Comparison of fitting of some mathematical models to describe the ruminal fermentation kinetics according to gas production technique for alfalfa hay. *Animal Production Research*, *5*(3), 35-47. (In Persian)